

Cinética de secagem de folhas de *Solanum lycocarpum* A. St.-Hil. (fruta-de-lobo)

PRATES, M.F.O.¹; REIS, R.C.^{2*}; DEVILLA, I.A.³; FARIA, R.Q.^{4*}; LIMA JUNIOR, A.F.³

¹IFMT-Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Mato Grosso do Sul, Câmpus Coxim-MS, Avenida Afonso Pena, 775, Bairro Amambai, CEP: 79005-000, Campo Grande-Brasil ²IFG-Instituto Federal de Goiás, Câmpus Aparecida de Goiânia-GO, Avenida Universitária Vereador Vagner da Silva Ferreira, Qd-1, Lt 1-A, Parque Itatiaia, CEP: 74968-755, Aparecida de Goiânia-Brasil *renataufg@gmail.com ³UEG-Universidade Estadual de Goiás, Câmpus Unucet, BR 153, Quadra Área, Km 99, CEP 75132-903, Anápolis-Brasil ⁴UEG-Universidade Estadual de Goiás, Câmpus Unu Ipameri-GO, Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal, Rodovia Go 330 Km 241 Anel Viário S/N, CEP: 75780-000, Ipameri-Brasil

RESUMO: Objetivou-se neste trabalho determinar o tempo de secagem e modelar as curvas de secagem de folhas de fruta-de-lobo (*Solanum lycocarpum* A. St.-Hil.) secas em temperaturas de 40, 50 e 60°C, num secador de leito fixo em camada fina com velocidade do ar de 0,81 m s⁻¹, bem como estimar o coeficiente de difusão efetivo e a energia de ativação. Aos dados experimentais foram ajustados oito modelos matemáticos. As magnitudes do coeficiente de determinação (R²), do erro médio relativo (P) e do erro médio estimado (SE) foram utilizadas para verificar o grau de ajuste dos modelos. Concluiu-se que: a) O tempo de secagem diminuiu com o aumento da temperatura; b) os modelos de secagem Logaritmo e de Midilli et al. foram os que melhor se ajustaram aos dados experimentais; c) Os valores do coeficiente de difusão aumentaram de acordo com a elevação da temperatura do ar de secagem e d) O valor da energia de ativação para a folha *Solanum lycocarpum* A. St.-Hil. foi de 44, 60 kJ mol⁻¹.

Palavras-chave: plantas medicinais, desidratação, difusividade efetiva

ABSTRACT: *Drying kinetics of leaves of Solanum lycocarpum* A. St.-Hil. (wolf apple). The aims of this study were to determine the drying time and the shape of the drying curves of leaves of wolf apple (*Solanum lycocarpum* A. St.-Hil.) dried at temperatures of 40, 50 and 60°C in a thin layer fixed-bed dryer at air velocity of 0.81 m s⁻¹, and to estimate the effective diffusion coefficient and activation energy. Eight mathematical models were fit to the experimental data. The magnitude of the coefficient of determination (R²), the mean relative error (P) and the estimated standard error (SE) were used to verify the fitting degree of the models. It was concluded that: a) The drying time decreased with increasing temperatures; b) the drying models of Logarithm and of Midilli et al. best fit to the experimental data; c) The values of the diffusion coefficient increased with the rising temperature of the drying air; d) The value of activation energy for the leaf of *Solanum lycocarpum* A. St.-Hil. was 44.60 kJ mol⁻¹.

Key words: medicinal plants, dehydration, effective diffusivity

INTRODUÇÃO

A *Solanum lycocarpum* A. St.-Hil. (fruta-de-lobo) é um arbusto perene típico do Cerrado brasileiro, pertencente à família Solanaceae Juss, podendo medir até 4 metros de altura. Possui ramos cilíndricos, lenhosos e tortuosos. As folhas são duras e espinhosas e os frutos têm forma globosa, ligeiramente achatada tendo de 8 a 12 cm de diâmetro (Corrêa, 1984).

O uso medicinal da fruta-de-lobo é amplamente difundido no bioma Cerrado. Tem-se

atribuído aos frutos da lobeira propriedade terapêutica hipoglicemiante e antiinflamatória (Dall-Agnol & Von-Poser, 2000). As folhas possuem propriedades emolientes e anti-reumáticas, e, das flores e frutos, faz-se tônicos contra asma, gripes e resfriados (Rocha et al., 2006).

Nas espécies medicinais, a secagem é uma operação unitária de preparação para o armazenamento, a fim de atender as necessidades da indústria farmacêutica de fitoterápicos que não tem

estrutura para usar as plantas frescas nas quantidades exigidas para a produção industrial (Lorenzi & Matos, 2002).

O processo de secagem implica em considerável redução de volume e indiretamente redução de custos em transportes e manipulação do produto, além de possibilitar a conservação das plantas por maior tempo (Silva & Casali, 2000).

De acordo com Resende et al. (2008), as curvas de secagem em camada delgada variam com a espécie, variedade, condições ambientais, métodos de preparo pós-colheita, entre outros fatores. Nesse sentido, diversos modelos matemáticos têm sido utilizados para descrever o processo de secagem de produtos agrícolas.

O coeficiente de difusão (D_{ef}) é uma difusividade efetiva que engloba os efeitos de todos os fenômenos que podem intervir sobre a migração da água, sendo o resultado obtido pelo ajuste de valores experimentais (Oliveira et al., 2006). O estudo da difusividade efetiva é importante na determinação da evolução de sistemas que sofrem processos de aquecimento ou resfriamento. Essa propriedade permite prever a velocidade da penetração de calor no interior do material, sendo assim de fundamental importância para o projeto de equipamentos e para o cálculo do processamento térmico (Carbonera et al., 2003).

Oliveira et al. (2006) determinaram a difusividade efetiva de raiz de chicória (*Cichorium endivia*) e verificaram que os modelos de Fick e de Page se ajustaram bem aos dados experimentais e, para os valores de difusividade efetiva calculada, somente a temperatura do ar mostrou-se significativa. Obtiveram um modelo de primeira ordem com valores de difusividade efetiva variando entre $3,51 \times 10^{-10}$ e $10,36 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para temperaturas de 60 a 80°C. Segundo Kashani-Nejad et al. (2007), a energia de ativação é barreira que deve ser ultrapassada para que o processo de difusão possa ser desencadeado no produto.

Dado a insuficiência de informações sobre a secagem de *Solanum lycocarpum* A. St.-Hil., o presente trabalho objetivou avaliar o efeito da

temperatura no tempo de secagem das folhas nas temperaturas de 40, 50 e 60°C; determinar as curvas de secagem definindo o melhor modelo para ajuste aos dados experimentais obtidos; estimar o coeficiente de difusividade efetiva (D_{ef}) e calcular a energia de ativação (E_a) para as folhas de lobeira.

MATERIAL E MÉTODO

As folhas foram colhidas no perímetro rural do município de Anápolis (GO), selecionadas e transportadas para o Laboratório de Secagem e Armazenagem de Produtos Vegetais na Unidade Universitária de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Estadual de Goiás (UEG), localizado em Anápolis, GO, onde os experimentos foram conduzidos.

Os teores iniciais de água das folhas de fruta-de-lobo foram determinados logo após a coleta, utilizando estufa de circulação forçada de ar a $105 \pm 3^\circ\text{C}$, por 24 horas (Brasil, 2009).

As folhas foram cortadas em tiras retangulares de 5,4 x 2,0 cm, imediatamente antes do início do processo de secagem. A secagem foi realizada em camada fina em secador de leito fixo (Figura 1), logo, a quantidade de amostra para secagem foi de apenas 25 g, em triplicata.

A perda de água das folhas durante o processo de secagem foi obtida por pesagens da amostra em balança analítica com precisão de 0,01 g. As pesagens foram conduzidas até que a variação de massa fosse constante na segunda casa decimal, ou seja, até que o produto atingisse o teor de água de equilíbrio (U_e), por três pesagens consecutivas. Após a secagem, as amostras foram levadas à estufa, para determinação do teor de água final ou de equilíbrio (Brasil, 2009).

As temperaturas de secagem foram fixadas em 40, 50 e 60°C. A velocidade do ar de secagem foi de $0,81 \text{ m s}^{-1}$, determinada por meio de anemômetro digital de pás rotativas colocado na parte superior da câmara de secagem. A umidade relativa do ar foi

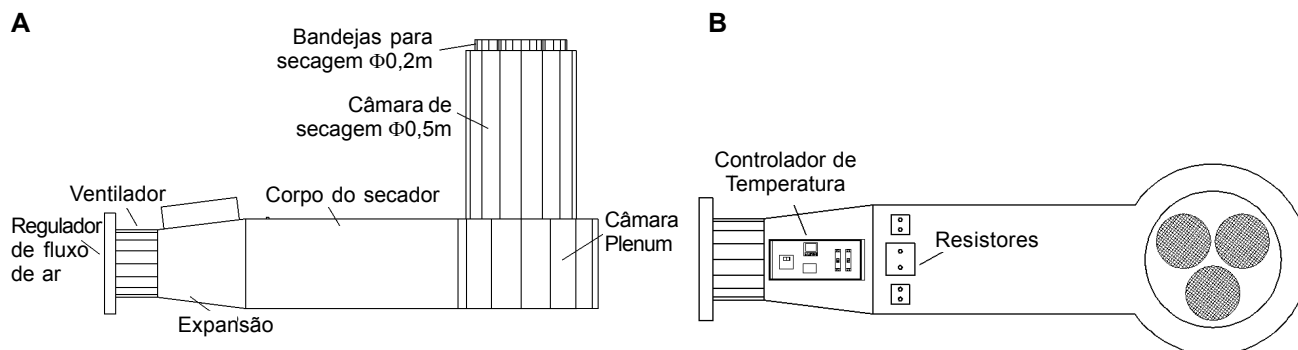


FIGURA 1. Secador experimental de leito fixo utilizado na secagem das folhas de fruta do Lobo. **A.** Vista lateral; **B.** Vista superior.

medida com termohigrômetro digital.

Para o cálculo da razão de umidade (RU), durante as secagens nas diferentes temperaturas, utilizou-se a expressão:

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} \quad (1)$$

em que,

U - teor de água do produto, decimal em base seca (b.s.);

U_i - teor de água inicial do produto, decimal b.s.; e

U_e - teor de água de equilíbrio do produto, decimal b.s.

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado. Foram ajustados aos dados experimentais, os seguintes modelos matemáticos de secagem conforme utilizados em outros trabalhos (Mohapatra & Rao, 2005; Martinazzo et al., 2007b; Goyalde et al., 2009; Reis et al., 2011):

$$\text{Modelo de Verna: } RU = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-k_1 t) \quad (2)$$

$$\text{Modelo de Logarítmico: } RU = a \exp(-k t) + c \quad (3)$$

$$\text{Modelo de Midilli et al.: } RU = a \exp(-k t^n) + b t \quad (4)$$

$$\text{Modelo de Page: } RU = \exp(-k t^n) \quad (5)$$

$$\text{Modelo de Newton: } RU = \exp(-k t) \quad (6)$$

$$\text{Modelo de Henderson e Pabis: } RU = a \exp(-k t) \quad (7)$$

$$\text{Modelo de H. \& P. modificado: } RU = a \exp(-k t) + b \exp(-k_0 t) + c \exp(-k_1 t) \quad (8)$$

$$\text{Modelo de Dois termos: } RU = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t) \quad (9)$$

em que,

RU - razão de umidade do produto, adimensional;

t - tempo de secagem, h;

k, k₀, k₁ - coeficientes de secagem, s⁻¹; e

a, b, c, n - constantes dos modelos, adimensional.

As magnitudes do coeficiente de determinação (R²), do erro médio relativo (P) e do erro médio estimado (SE) foram utilizadas para verificar o grau de ajuste dos modelos, que foram calculados conforme as equações abaixo:

$$SE = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - Y_0|}{Y} \quad (10)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - Y_0)^2}{GLR}} \quad (11)$$

em que,

Y - valor observado experimentalmente;

Y₀ - valor calculado pelo modelo;

n - número de observações experimentais, e

GLR - graus de liberdade do modelo.

O coeficiente de difusão efetivo foi obtido por

meio do ajuste do modelo matemático da difusão líquida, descrito pela Equação 12, aos dados experimentais da secagem das folhas de fruta do lobo. Essa equação é a solução analítica para a segunda lei de Fick, considerando a forma geométrica do produto como aproximação a uma placa plana, desconsiderando a contração volumétrica da mesma (Brooker et al., 1992).

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{ef} \cdot t}{4 \left(\frac{S}{V}\right)^2}\right] \quad (12)$$

em que,

D_{ef} - coeficiente de difusão efetivo, m² s⁻¹;

S - área da placa equivalente, m²;

V - volume da placa equivalente, m³;

t - tempo, h;

n - número de termos.

A solução analítica da Equação 12 apresenta-se na forma de uma série infinita e, portanto, o número finito de termos (n) no truncamento poderá determinar a precisão dos resultados.

Para avaliar a influência da temperatura no coeficiente de difusão efetivo foi utilizada a equação de Arrhenius.

$$D_{ef} = D_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT_a}\right) \quad (13)$$

em que,

D₀ - fator pré-exponencial, m² s⁻¹;

E_a - energia de ativação, kJ mol⁻¹;

R - constante universal dos gases, 8,314 kJ kmol⁻¹ K⁻¹; e

T_a - temperatura absoluta, K.

RESULTADO E DISCUSSÃO

O teor de água inicial para as folhas de *Solanum lycocarpum* A. St.-Hil. foi de 71,9% b.s. A cinética de secagem das folhas de fruta-de-lobo é apresentada na forma adimensional do conteúdo de umidade (RU), em função do tempo, na Figura 2, bem como a umidade final das amostras para cada temperatura estão representadas pela U_e. As umidades relativas do ar de secagem foram 0,59; 0,53 e 0,37 para as temperaturas de 40, 50 e 60°C, respectivamente.

Nota-se que para as temperaturas de 40, 50 e 60°C foram necessários tempos de 3 h e 67 min; 2 h e 92 min e 1 h e 50 min, respectivamente, para que as folhas atingissem a umidade de equilíbrio. Martins (2000) secaram folhas de capim limão (*Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf.) em temperaturas que variaram de 40 a 60°C e velocidade do ar de 1 m s⁻¹ em tempos que variaram de 3 h e 83 min a 1 h e 28 min,

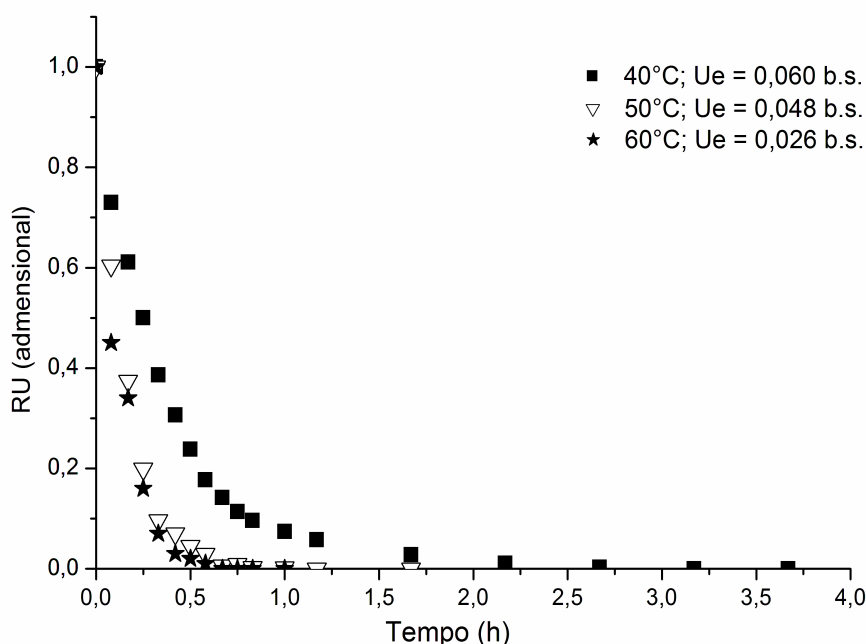


FIGURA 2. Curvas de secagem das folhas de *Solanum lycocarpum* St. Hil. nas temperaturas de 40, 50 e 60°C ; Umidade de Equilíbrio (U_e) em base seca (b.s.).

respectivamente. O fato do tempo de secagem diminuir com o aumento da temperatura ocorre devido ao aumento do potencial de secagem em decorrência do aumento da temperatura do ar, ocasionando diminuição da umidade relativa do ar de secagem (Silva et al., 1995).

Na Tabela 1, encontram-se os parâmetros estatísticos utilizados para a comparação entre os oito modelos de secagem analisados, nas diversas condições de secagem utilizadas neste trabalho.

Para as três temperaturas utilizadas na secagem das folhas verifica-se que todos os modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais apresentaram coeficientes de determinação (R^2) superior a 98%. De acordo com Madamba et al. (1996), o coeficiente de determinação (R^2), sozinho, não constitui bom critério para a seleção de modelos não lineares; por isso, os valores para o erro médio estimado (SE) e erro médio relativo (P) foram considerados.

Analisando o SE, nota-se que para as temperaturas em estudo, todos os modelos obtiveram valores inferiores a 0,04, sendo o modelo de Logaritmo o que obteve os menores valores dentro das três temperaturas em estudo.

Os valores de P indicam o desvio dos valores observados em relação à curva estimada pelo modelo (Kashani-Nejad et al., 2007) e segundo Mohapatra & Rao (2005), valores inferiores a 10% são recomendados para a seleção de modelos. Para o valor do erro médio relativo (P) o modelo de Logaritmo foi o mais satisfatório, seguido pelo modelo de Midilli

et al. Assim, nas condições em que este trabalho foi realizado, os modelos Logaritmo e de Midilli et al. foram selecionados para representar a cinética de secagem das folhas de *Solanum lycocarpum* A. St.-Hil.

Com base nos valores dos parâmetros obtidos nos ajustes dos modelos de Logaritmo e Midilli et al. realizou-se análise de variância seguida de regressão para determinação dos coeficientes, a fim de prever o modelo de cada parâmetro na secagem em função da temperatura do ar utilizada (Tabela 2).

Na Tabela 2 é possível observar que somente o parâmetro k do modelo de Logaritmo e Midilli et al. e as constantes a e n do de Midilli et al. tiveram coeficientes significativos a 5% de probabilidade, contudo, as respectivas equações encontram-se na Tabela 3.

Dessa forma, o parâmetro k foi ajustado à equação linear obtendo coeficientes de determinação (R^2) maior que 98,87%, valores de erro médio relativo (P) menor que 3,40%, e valores de erro médio estimado (SE) menor que 0,18. Na Figura 3 é mostrado valores experimentais e estimados de razão de umidade pela estimativa dos parâmetros do modelo de Logaritmo e de Midilli et al. nas diferentes temperaturas de secagem.

Em virtude do mecanismo de transporte da água no interior do produto ocorrer por meio de difusão de vapor, utilizou-se a Equação 12 baseada na Lei de Fick, com quatro termos para produtos com forma geométrica de placa plana para estimar a difusividade efetiva do produto (D_{ef}).

TABELA 1. Parâmetros obtidos dos modelos ajustados, coeficiente de determinação (R^2) erro estimado (SE) e erro médio relativo (P) calculados para verificação do ajuste dos modelos matemáticos aos valores experimentais de secagem das folhas de *Solanum lycocarpum* A. St.-Hil., à 40, 50 e 60°C.

| Modelos | T (°C) | a | k | n | b | c | K_0 | K_1 | R^2 (%) | SE (decimal) | P (%) |
|-----------------------|-----------|--------|-------|------|--------|-------|--------|--------|--------------|-----------------|----------|
| Verna | 40 | 0,09 | 1,01 | - | - | - | - | 3,23 | 99,57 | 0,03 | 7,14 |
| | 50 | 111,97 | 4,91 | - | - | - | - | 4,92 | 99,88 | 0,01 | 70,01 |
| | 60 | 0,81 | 6,38 | - | - | - | - | 316,75 | 99,39 | 0,02 | 29,92 |
| Logarítmico | 40 | 0,97 | 2,72 | - | | 0,01 | - | - | 99,52 | 0,02 | 3,13 |
| | 50 | 1,01 | 6,01 | - | | 0,00 | - | - | 99,85 | 0,01 | 7,63 |
| | 60 | 0,98 | 10,06 | - | | 0,00 | - | - | 99,00 | 0,01 | 1,52 |
| Midilli et al. | 40 | 0,99 | 2,72 | 1,07 | 0,00 | - | - | - | 99,90 | 0,04 | 10,31 |
| | 50 | 1,00 | 6,01 | 0,94 | 0,00 | - | - | - | 99,91 | 0,01 | 8,00 |
| | 60 | 0,99 | 10,06 | 0,86 | -0,01 | - | - | - | 99,23 | 0,03 | 15,84 |
| Page | 40 | - | 2,70 | 0,93 | - | - | - | - | 99,59 | 0,03 | 34,39 |
| | 50 | - | 6,96 | 1,07 | - | - | - | - | 99,13 | 0,01 | 133,12 |
| | 60 | - | 9,11 | 0,86 | - | - | - | - | 99,21 | 0,02 | 12,78 |
| Newton | 40 | - | 2,89 | - | - | - | - | - | 99,47 | 0,02 | 132,17 |
| | 50 | - | 6,26 | - | - | - | - | - | 99,84 | 0,01 | 42,69 |
| | 60 | - | 9,33 | - | - | - | - | - | 98,94 | 0,02 | 172,98 |
| Henderson e Pabis | 40 | 0,98 | 2,81 | - | - | - | - | - | 99,54 | 0,03 | 105,57 |
| | 50 | 1,01 | 6,30 | - | | - | - | - | 99,84 | 0,01 | 44,83 |
| | 60 | 0,98 | 9,60 | - | | - | - | - | 98,99 | 0,02 | 140,69 |
| H. & P. modificado | 40 | 0,21 | 3,06 | - | 0,05 | 0,72 | 0,79 | 3,06 | 99,59 | 0,04 | 6,44 |
| | 50 | 47,23 | 4,97 | - | 89,54 | 43,31 | 3,96 | 4,97 | 99,87 | 0,01 | 95,52 |
| | 60 | 27,15 | 6,00 | - | 126,39 | 0,24 | 4,99 | 319,54 | 99,52 | 0,03 | 25,67 |
| Dois termos | 40 | 0,05 | - | - | 0,93 | - | 0,79 | 3,06 | 99,59 | 0,04 | 7,14 |
| | 50 | 1,30 | - | - | -0,30 | - | 7,16 | 6,68 | 99,90 | 0,01 | 112,27 |
| | 60 | 0,19 | - | - | 0,81 | - | 316,73 | 12,38 | 99,40 | 0,03 | 29,91 |

TABELA 2. Análise de variância e regressão para os parâmetros de secagem dos modelos de Logaritmo e Midilli et al.

| Modelo | Parâmetro | | Coeficiente | Teste t | P valor |
|----------------|-----------|---------|-----------------------|---------|---------|
| Logaritmo | a | Linear | 0,968 ^{ns} | 9,407 | 0,067 |
| | | Angular | 0,001 ^{ns} | 0,170 | 0,893 |
| | k | Linear | -12,814 ^{ns} | -8,655 | 0,073 |
| | | Angular | 0,388* | 13,286 | 0,048 |
| | c | Linear | 0,030 ^{ns} | 8,731 | 0,073 |
| | | Angular | -0,001 ^{ns} | -7,977 | 0,079 |
| Midilli et al. | a | Linear | 0,990* | 48,94 | 0,013 |
| | | Angular | 0,001 ^{ns} | 0,220 | 0,862 |
| | k | Linear | -5,5952 ^{ns} | -1,718 | 0,336 |
| | | Angular | 0,367* | 3,379 | 0,183 |
| | b | Linear | 0,016 ^{ns} | 1,030 | 0,491 |
| | | Angular | -0,00 ^{ns} | -1,057 | 0,482 |
| | n | Linear | 1,496* | 21,235 | 0,030 |
| | | Angular | -0,011 ^{ns} | -7,740 | 0,082 |

* significativo a 5% de probabilidade; ^{ns} não significativo

TABELA 3. Equações dos parâmetros dos modelos de Logaritmo e Midilli et al. em função da temperatura do ar de secagem das folhas de fruta do lobo.

| Modelo | Parâmetro | Equação | R ² (%) | SE(decimal) | P(%) |
|----------------|--------------|----------|--------------------|-------------|------|
| Logaritmo | k | 0,39 T | 98,87* | 0,07 | 0,39 |
| Midilli et al. | k | 0,37 T | 99,29* | 0,18 | 3,40 |
| | Valor médio: | a = 0,99 | - | - | - |
| | Valor médio: | n = 1,50 | - | - | - |

* significativo a 5% de probabilidade

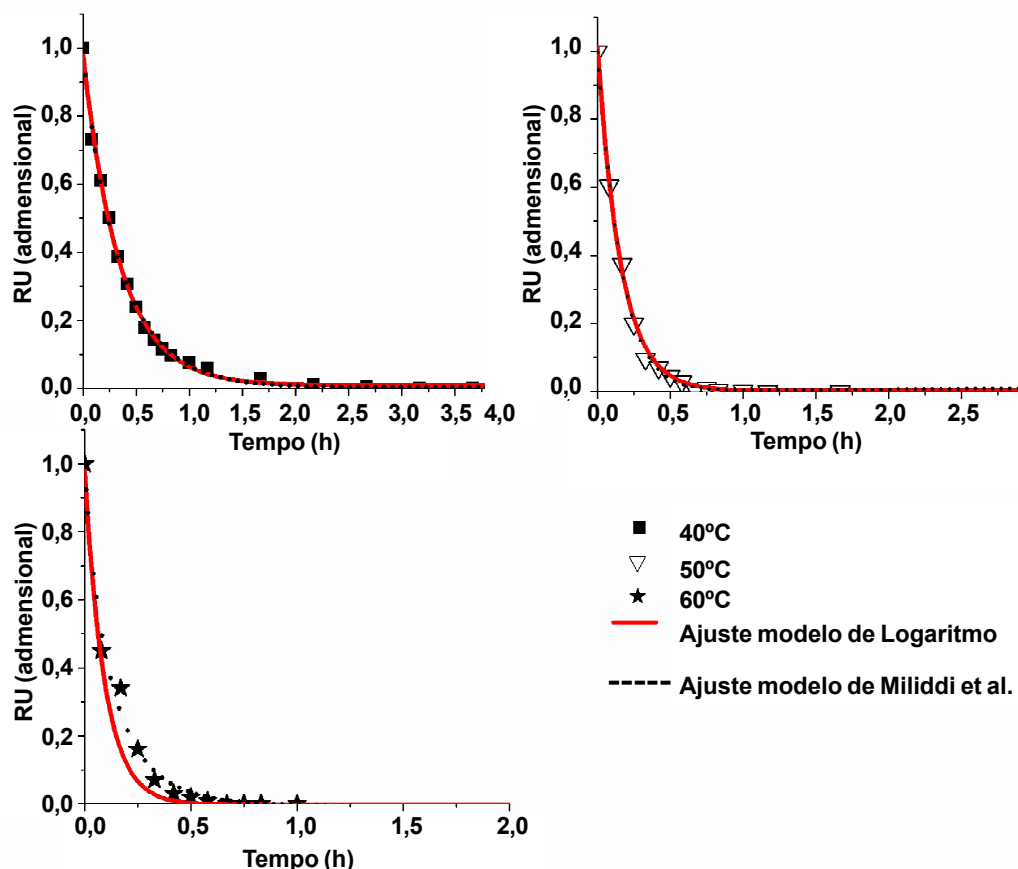


FIGURA 3. Valores experimentais e estimados de razão de umidade pela estimativa dos parâmetros do modelo de Logaritmo e de Midilli et al., nas diferentes temperaturas de secagem.

Os valores obtidos para cada condição de secagem estão descritos na Tabela 4.

Nota-se que os valores da difusividade aumentaram com a elevação da temperatura de secagem variando de $2,81 \times 10^{-11}$ a $8,85 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para as temperaturas de 40 e 60°C, respectivamente. Segundo Zogzas et al. (1996), os valores de D_{ef} para produtos alimentícios se encontram na faixa de 10^{-11} a $10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Martinazzo et al. (2007b), secaram folhas de capim limão a 30, 40, 50 e 60°C e obtiveram como melhor modelo para estimar a secagem o de Midilli et al.

Martinazzo et al. (2007a) secaram nas mesmas condições o *Cymbopogon citratus* e

obtiveram valores do coeficiente de difusão variando entre $4,00 \times 10^{-12}$ a $3,90 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

TABELA 4. Valores da difusividade efetiva (D_{ef}) obtidos para em diferentes temperaturas do ar de secagem para folhas de *Solanum lycocarpum* St. Hil.

| Temperatura (°C) | D_{ef} ($10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) | R ² (%) | SE (adimensional) | P (%) |
|------------------|---|--------------------|-------------------|-------|
| 40 | 2,81 | 99,02 | 0,02 | 9,54 |
| 50 | 5,03 | 98,89 | 0,02 | 8,26 |
| 60 | 8,85 | 99,12 | 0,01 | 7,04 |

A Figura 4 mostra os valores de D_{ef} apresentados na forma de " $\ln D_{ef}$ " descritos em função do recíproco da temperatura absoluta (T^{-1}). O ajuste linear obtido indica que 99,83% dos valores de $\ln D_{ef}$ se ajustaram a curva linear. Segundo Goneli (2007), a variação do coeficiente de difusão efetivo se dá com a elevação da temperatura, o que aumenta o nível de vibração molecular das moléculas de água e contribui para difusão mais rápida. Portanto, pode-se dizer que houve maior difusão na temperatura 60°C.

A inclinação da curva da representação de

Arrhenius fornece a relação $E_a R^{-1}$ (Energia de ativação sobre a constante universal dos gases), enquanto a sua interseção com o eixo das ordenadas indica o valor de D_0 (fator pré-exponencial).

A Equação 14 apresenta os coeficientes da equação ajustada para o coeficiente de difusão efetivo das folhas de *Solanum lycocarpum* A. St.-Hil., estimados de acordo com a Equação 13.

$$R_{ef} = \exp \left(\frac{-44600,62}{RT} \right) \quad (14)$$

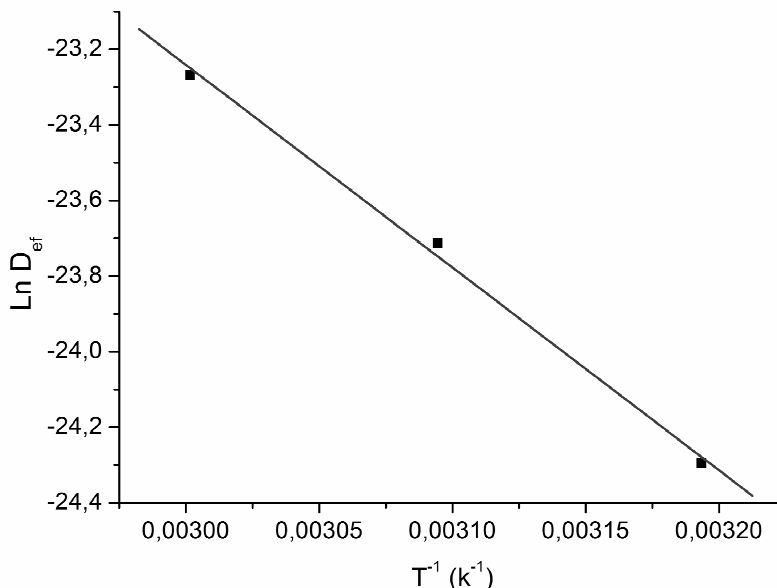


FIGURA 4. Representação de Arrhenius para a relação entre a difusividade efetiva e a temperatura absoluta na secagem das folhas de *Solanum lycocarpum* A. St.-Hil.

A energia de ativação (E_a) calculada da reta obtida na Figura 4 foi de 44,60 kJ mol⁻¹. Nos processos de secagem, quanto menor a energia de ativação, maior será a difusividade de água no produto (Goneli, 2007).

CONCLUSÃO

Nas condições em que foi desenvolvido este trabalho e com resultados obtidos, pode-se concluir que: a) o tempo para as temperaturas de secagens de 40, 50 e 60°C foram de 3 h e 67 min; 2 h e 92 min e 1 h e 50 min, respectivamente; b) os modelos matemáticos de secagem de Logaritmo e de Midilli et al. foram os que melhor se ajustaram aos dados experimentais; c) os valores do coeficiente de difusão aumentaram de acordo com a elevação da temperatura do ar de secagem, apresentando resultados entre $2,81 \cdot 10^{-11}$ a $8,85 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$; d) a dependência da difusividade em relação à temperatura foi descrita pela equação de Arrhenius, por meio da qual se obteve o valor da energia de ativação de 44,60 kJ mol⁻¹.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem a Capes pelo auxílio financeiro concedido pelo Programa de Auxílio Especial aos mestrandos do curso de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Goiás.

REFERÊNCIA

- BRASIL, Ministério da Agricultura, do Abastecimento e da Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**. Brasília: SNAD/DNDV/CLAV, 2009. 398p.
- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport: The Avi Publishing Company, 1992. 450p.
- CARBONERA, L. et al. Determinação experimental da difusividade térmica de uma massa de tomate comercial. **Brazilian Journal of Food Technology**, v.6, n.2, p.285-90, 2003.
- CORRÊA, M.P. **Dicionário de plantas úteis do Brasil e exóticas cultivadas**. Brasília: Ministério da Agricultura / Instituto Brasileiro de desenvolvimento florestal. 1984. v.1. 747p.

- DALL-AGNOL, R.; VON-POSER, G.L. The use of complex polysaccharides in the management of metabolic diseases: the case of *Solanum lycocarpum* fruits. **Journal of Ethnopharmacology**, v.71, n.1/2, p.337-41, 2000.
- GONELI, A.L.D. **Dinâmica da variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade das sementes de mamona (*Ricinus communis* L.) durante a secagem e o armazenamento sob condições controladas**. 2007. 192p. Tese (Doutorado - Área de Pré-Processamento e Armazenagem de Produtos Agrícolas) - Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- GOYALDE, N.A. et al. Mathematical modeling of the drying kinetics of sugarcane slices. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.11, n.2, p.117-21, 2009.
- KASHANI-NEJAD, M.A.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDIA, G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v.78, n.1, p.98-108, 2007.
- LORENZI, H.; MATOS, F.J.A. **Plantas medicinais no Brasil: nativas e exóticas**. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2002. 512p.
- MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. Thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v.29, n.1, p.75-97, 1996.
- MARTINAZZO, A.P. et al. Difusividade efetiva em folhas de *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf submetidas à secagem com diferentes comprimentos de corte e temperaturas do ar. **Revista Brasileira de Plantas Medicinais**, v.9, n.1, p.68-72, 2007a.
- MARTINAZZO, A.P. et al. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.3, p.301-6, 2007b.
- MARTINS, P.M. **Influência da temperatura e velocidade do ar de secagem no teor e na composição química do óleo essencial de capim limão (*Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf)**. 2000. 77p. Dissertação (Mestrado na Área de Pré-Processamento e Armazenagem de Produtos Agrícolas) - Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- MOHAPATRA, D.; RAO, P.S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v.66, n.4, p.513-8, 2005.
- OLIVEIRA, R.A.; OLIVEIRA, W.P.; PARK, K.J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. **Engenharia Agrícola**, v.26, n.1, p.181-9, 2006.
- REIS, R.C. et al. Modelagem matemática da secagem da pimenta Cumari do Pará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.4 p.347-53, 2011.
- RESENDE, O. et al. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.10, n.1, p.17-26, 2008.
- ROCHA, C.; TEJERINA-GARRO, F.L.; PIETRAFESA, J.P. **Cerrado, sociedade e ambiente: desenvolvimento sustentável em Goiás**. Goiânia: Editora da Universidade Católica de Goiás, 2006. v.1. 287p.
- SILVA, J.S.; AFONSO, A.D.L.; GUIMARÃES, A.C. Estudos dos métodos de secagem. In: SILVA, J.S. **Pré-processamento de produtos agrícolas**. Juiz de Fora: Instituto Maria, 1995. p.105-43.
- SILVA, F.; CASALI, V.W.D. **Plantas medicinais e aromáticas: pós-colheita e óleos essenciais**. Viçosa: Arte e Livros, 2000. 135p.
- ZOGZAS, N.P.; MAUROULIS, Z.B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. **Drying Technology Bangkok**, v.14, n.10, p.2225-53, 1996.